

# 宫保鸡丁微波烹饪工艺优化及其挥发性风味物质分析

林丹, 吴宝珠, 冷朝杰, 贾洪锋\*, 易宇文, 许程剑, 杨杰, 何彦霖

(四川旅游学院食品学院, 成都 610100)

**摘要: 目的** 对比分析微波和炒制烹饪的宫保鸡丁菜肴挥发性香气成分的差异, 开发微波宫保鸡丁调理食品。**方法** 选取醋添加量、水淀粉添加量、微波功率、微波时间进行单因素试验, 以感官评分、蒸煮损失、色差为指标, 利用正交试验和综合评价优化宫保鸡丁微波烹饪工艺, 采用气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)分析微波和炒制烹饪宫保鸡丁挥发性风味物质差异。**结果** 当醋添加量 12 g、水淀粉添加量 10 g、微波功率 700 W、微波时间为 5 min 时, 综合评分为 0.70±0.05, 产品色香味俱佳。两种烹饪方法中, GC-IMS 共鉴定出 60 种挥发性物质, 从指纹图谱和峰强度来看, 炒制的宫保鸡丁风味物质更丰富, 除了萜烯类, 醛类、醇类、酮类、酯类、含硫化合物、杂环类、酚类总峰强度皆高于微波烹饪的宫保鸡丁, 炒制和微波宫保鸡丁的关键风味物质相似, 其共有的关键风味化合物包括 3-甲基丁醛、甲硫基丙醛、乙酸乙酯、苜烯、己醛、壬醛、二甲基二硫醚、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、3-羟基-2-丁酮、1,8-桉叶素等 18 种, 但贡献度差别明显。**结论** 炒制和微波两种烹饪方式对宫保鸡丁挥发性风味物质影响较大, 微波烹饪的宫保鸡丁的香气成分丰富度略差于炒制的宫保鸡丁。

**关键词:** 宫保鸡丁; 微波; 气相色谱-离子迁移谱法; 综合评价; 蒸煮损失; 挥发性风味物质

## Optimization of processing technology of Kung Pao chicken by microwave and analysis of volatile flavor components

LIN Dan, WU Bao-Zhu, LENG Chao-Jie, JIA Hong-Feng\*, YI Yu-Wen,  
XU Cheng-Jian, YANG Jie, HE Yan-Lin

(College of Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

**ABSTRACT: Objective** To compare the differences of volatile flavor components in Kung Pao chicken cooked by microwave and stir-frying, and develop the prepared food of Kung Pao chicken cooked by microwave. **Methods** The

**基金项目:** 四川省科技计划项目(2019YJ0343)、烹饪科学四川省高等学校重点实验室项目(PRKX201802)、四川旅游学院校级科研项目(2020SCTU12)、四川旅游学院高水平科研项目培育专项(2022PY02)、四川旅游学院创新团队项目(19SCTUTY04、20SCTUTY03)、大学生创新创业训练计划项目(S201911552040)

**Fund:** Supported by the Science and Technology Planning Project of Sichuan Province (2019YJ0343), the Key Laboratory of Culinary Science College and Universities Project of Sichuan Province (PRKX201802), the Scientific Research Project of Sichuan Tourism University (2020SCTU12), the Cultivation Project for High Level Scientific Research Project of Sichuan Tourism University (2022PY02), the Innovation Team Project of Sichuan Tourism University (19SCTUTY04, 20SCTUTY03), and the College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program Project (S201911552040)

\*通信作者: 贾洪锋, 硕士, 教授, 主要研究方向为食品分析与检测技术。E-mail: jiahongfeng\_cq@163.com

\*Corresponding author: JIA Hong-Feng, Master, Professor, College of Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, No.459, Hongling Road, Longquanyi, Chengdu 610100, China. E-mail: jiahongfeng\_cq@163.com

addition amount of vinegar, water starch, microwave power and microwave time were selected for single factor experiment with the sensory evaluation score, cooking loss and color difference as indicators. Then microwave processing technology of Kung Pao chicken was optimized by orthogonal test and comprehensive evaluation. Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) was used to analyze the differences of volatile flavor compounds between Kung Pao chicken cooked by microwave and stir-frying. **Results** When the addition of vinegar was 12 g, water starch was 10 g, microwave power was 700 W, and the microwave time was 5 min, the Kung Pao chicken was bright in color and rich in fragrance, and the comprehensive score was  $0.70\pm 0.05$ . In the 2 kinds of cooking methods, 60 kinds of volatile flavor compounds were identified by GC-IMS. According to the fingerprint and peak intensity, the volatile flavor compounds of stir-frying Kung Pao chicken were more abundant, and the total peak intensities of aldehydes, alcohols, ketones, esters, sulfur compounds, heterocyclic compounds and phenols were higher than those of microwave cooked Kung Pao chicken except for terpene. The key flavor compounds of stir-frying and microwave cooked Kung Pao chicken were similar, including 18 kinds of key flavor compounds, such as 3-methylbutanal, methional, ethyl acetate, camphene, hexanal, nonanal, dimethyl disulfide, 2-ethyl-3,5-dimethyl pyrazine, 3-hydroxy-2-butanone, 1,8-cineole-M, etc., but the difference in contribution was obvious. **Conclusion** Stir-frying and microwave cooking methods have great influence on the volatile flavor components of Kung Pao chicken, the flavor richness of Kung Pao chicken cooked by microwave is slightly worse than that cooked by stir-frying.

**KEY WORDS:** Kung Pao chicken; microwave; gas chromatography-ion mobility spectrometry; comprehensive score; cooking loss; volatile flavor components

## 0 引言

调理食品, 又被称为方便预制食品, 其定义为以农、畜、禽、水产品为原材料, 经过适当的加工, 在冷冻( $-18^{\circ}\text{C}$ )、冷藏( $\leq 7^{\circ}\text{C}$ )或常温条件下贮藏、运输和销售, 经过简单加工或复热后可食用的食品<sup>[1]</sup>。调理食品的研发和生产有利于应对疫情、地震、海啸等突发事件, 保证人民的营养和健康。据统计, 2017—2020 年我国预制菜的年均复合增长率为 28.8%, 随着消费升级及冷链物流布局, 预计 2023 年中国预制菜规模将达到 5165 亿元<sup>[2]</sup>。我国预制菜尚属起步阶段, 目前, 国内部分学者对微波辣子鸡丁<sup>[3]</sup>、低温真空油炸小黄鱼<sup>[4]</sup>等调理食品的加工工艺进行了研究。宫保鸡丁作为一道中式传统名菜, 以其红而不辣、鸡肉细嫩而闻名中外。但是, 受厨师个人经验、习惯、情绪等多方面因素影响, 其品质和风味存在很大变化性和模糊性, 不利于实现产品规模化和标准化生产<sup>[5]</sup>。目前, 国内对宫保鸡丁的报道多为配方的优化, 烹饪方式多以炒制、油炸<sup>[6]</sup>、超高压<sup>[7]</sup>为主, 以微波烹饪宫保鸡丁的研究和报道较少。与其他烹饪方式相比, 微波加热为介电感应加热, 不需要加热介质, 具有效率高、时间可控、程序可控、操作简单、能源消耗少等优点, 且能较好地保持产品的营养成分<sup>[8]</sup>。

本研究以传统菜肴宫保鸡丁作为研究对象, 以感官评分、蒸煮损失、色差为指标进行综合评价, 通过正交试验优化宫保鸡丁微波烹饪工艺, 采用气相色谱-离子迁移

谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)分析炒制和微波两种烹制方式的宫保鸡丁挥发性风味物质差异, 旨在研发一种方便、美味的微波宫保鸡丁调理食品, 为工业化生产品质与传统烹饪菜肴无明显差异的方便预制食品提供一定理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

一级陈醋(四川宝宁醋有限公司); 生抽、老抽(佛山市海天高明调味食品有限公司); 食用盐(四川久大有限公司); 料酒(千禾味业食品股份有限公司); 味精(成都市国泰实业有限责任公司); 食用油(郑州市清栋粮油商贸有限公司); 鸡腿肉、花生仁、干辣椒、花椒、大蒜、生姜、白糖、淀粉(成都市龙泉驿区永辉超市)。

### 1.2 仪器与设备

P70D20N1P-G5(WO)型微波炉(广东格兰仕微波生活电器有限公司); AS842A 红外线测温仪(东莞万创电子制品有限公司); FlavourSpec®风味分析仪(德国 GAS 公司); MXT-5 金属毛细管气相色谱柱( $15\text{ m}\times 0.53\text{ mm}$ ,  $1\text{ }\mu\text{m}$ , 美国 Restek 公司); DC-P3 色差仪(北京市兴光测色仪器有限公司)。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 配方和工艺流程

本研究以 200 g 生鸡腿肉丁为基础, 参考 DB51/T

1728—2014《中国川菜经典菜肴制作工艺规范》中宫保鸡丁配方进行优化。微波和传统炒制烹饪工艺流程如图 1 所示。

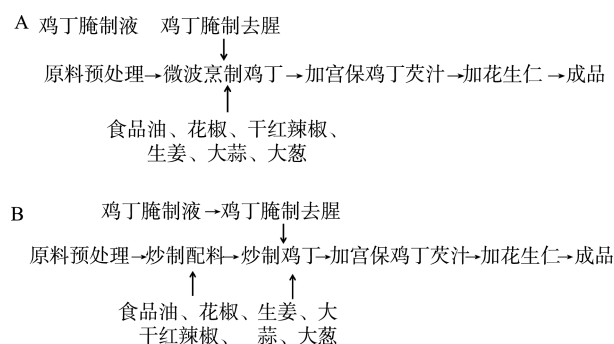


图 1 宫保鸡丁微波(A)和炒制(B)烹饪工艺流程

Fig.1 Microwave (A) and stir-frying (B) cooking process of Kung Pao chicken

### 1.3.2 操作要点

**鸡丁腌制液:** 按照食用盐 2.66 g、老抽 3 g、料酒 2.5 g、水淀粉 6 g 调制, 混合均匀, 备用。其中, 水淀粉以淀粉:水=2:3 (*m:m*)比例混合, 宫保鸡丁芡汁配方中水淀粉同此比例。

**原料预处理:** 将鸡腿肉去骨、去皮、去筋腱, 切成 1.5 cm 见方的肉丁, 放入容器中, 加入鸡丁腌制液, 腌制 10 min 去腥; 姜、蒜切 1.2 cm 见方的片状; 大葱、干辣椒切成 1 cm 段状。

**宫保鸡丁芡汁:** 按照白砂糖 10 g、食用盐 1.33 g、味精 1 g、生抽 12 g、醋 10 g、料酒 2.5 g、水淀粉 4 g 调制, 混合均匀, 备用。按照以下两种方式进行烹饪:

#### (1)微波烹饪

按照配方在容器中加入食用油 75 g、腌渍后的鸡丁、干红辣椒 8 g、花椒 2 g、生姜 3 g、大蒜 5 g、大葱 40 g, 混合均匀后放入微波炉, 按照设定的时间和功率加热 3 min 后取出, 加入调好的宫保鸡丁芡汁和去皮花生仁 50 g, 混合均匀后继续微波加热, 每隔 2 min 取出一次, 搅拌均匀。

#### (2)传统炒制烹饪

由川菜烹饪大师按照 DB51/T 1728—2014《中国川菜经典菜肴制作工艺规范》进行宫保鸡丁的炒制。锅中放油加热, 烧至 150℃, 放入干辣椒、花椒炒香, 加入腌制后的鸡丁炒至断生, 再加入蒜片、姜片、葱丁炒香, 倒入备好的芡汁, 炒至收汁浓稠呈包芡状, 放入酥花生炒匀, 装盘。

### 1.3.3 单因素试验

以醋添加量 10 g, 水淀粉添加量 10 g, 微波功率 595 W, 微波加热 6 min 为基础配方和烹饪工艺参数。在此基础上, 分别考查醋添加量(6、8、10、12、14 g)、水淀粉添加量(6、8、10、12、14 g)、微波功率(259、280、462、595、700 W)及微波加热时间(4、5、6、7、8 min) 4 个单因素对微波宫

保鸡丁的感官评分、蒸煮损失、色差值  $\Delta E$  3 个指标的影响, 确定加工条件进行正交优化试验。

### 1.3.4 正交试验设计

以微波烹饪宫保鸡丁综合评分  $Y$  为指标, 采用  $L_9(3^4)$  正交试验进行工艺优化, 试验设计因素及水平见表 1。

表 1 宫保鸡丁微波烹饪工艺正交试验因素水平设计  
Table 1 Design of orthogonal experiments factor levels for Kung Pao chicken cooked by microwave

水平	A 醋添加量 /g	B 水淀粉添加量 /g	C 微波功率 /W	D 微波时间 /min
1	10	8	462	5
2	12	10	595	6
3	14	12	700	7

### 1.3.5 感官评价

评分标准参照 DB51/T 1728—2014 中宫保鸡丁感官评价标准并稍做修改, 见表 2。选取 10 名食品专业人员分别对微波宫保鸡丁的色泽、香气、滋味、组织形态进行感官评定, 满分为 100 分, 评价结果取其平均值。

表 2 宫保鸡丁的感官评分标准  
Table 2 Sensory evaluation criteria of Kung Pao chicken

项目	评分标准	分值
色泽	色泽棕红, 光泽明亮, 富有食欲	16~25
	鸡丁色泽棕红, 光泽较明亮	11~15
	鸡丁色泽略显棕红, 光泽较暗	≤10
香气	糖醋味浓郁	16~25
	糖醋味较浓	11~15
	糖醋味一般	≤10
滋味	质地滑嫩、花仁酥脆、咸鲜略带甜酸	16~25
	鸡丁肉质较嫩、花仁酥脆	11~15
	鸡丁肉质较柴、花仁较脆	≤10
形态	鸡丁粒粒成形、收汁完美	16~25
	鸡丁粒粒成形、汤汁未完全收完	≤10

### 1.3.6 色差的测定

用色差仪对每组样品的鸡丁色度值进行测定, 重复测定 3 次取平均值<sup>[9]</sup>。样品色泽参数为  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ , 色差  $\Delta E$  是以传统炒制宫保鸡丁为对照, 反映传统炒制与微波烹饪宫保鸡丁鸡肉间的颜色差异,  $\Delta E$  越大说明鸡肉色泽变化越明显。色差  $\Delta E$  按照式(1)计算:

$$\Delta E = [(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中,  $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$  为炒制宫保鸡丁鸡肉的色度值;  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  为微波烹饪宫保鸡丁鸡肉的色度值。

### 1.3.7 蒸煮损失的测定

蒸煮损失按照公式(2)计算<sup>[10]</sup>, 重复测定 3 次取平均值:

$$\text{蒸煮损失}/\%=(W_1-W_2)/W_1 \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $W_1$  为鸡丁加热前的质量/g;  $W_2$  为鸡丁加热后冷却至室温的质量/g。

### 1.3.8 微波宫保鸡丁品质综合评分

将感官评分、蒸煮损失和色差  $\Delta E$  值进行归一化处理, 根据权重系数计算综合得分( $Y$ )。感官品质被认为是微波烹饪宫保鸡丁工艺优化的重要前提基础, 故感官评分权重系数为 0.5, 蒸煮损失权重系数为 0.3, 色差权重系数为 0.2<sup>[11]</sup>。其中, 感官归一值( $D_i$ )、蒸煮损失归一值( $W_i$ )、色差归一值( $E_i$ )和综合得分( $Y_i$ )按照公式(3)~(6)计算<sup>[11]</sup>:

$$D_i=(d_i-d_{\min})/(d_{\max}-d_{\min}) \quad (3)$$

$$W_i=(w_{\max}-w_i)/(w_{\max}-w_{\min}) \quad (4)$$

$$E_i=(e_{\max}-e_i)/(e_{\max}-e_{\min}) \quad (5)$$

$$Y_i=D_i \times 0.5+W_i \times 0.3+E_i \times 0.2 \quad (6)$$

式中,  $D_i$  为第  $i$  次试验感官评价分数归一化值;  $d_i$  为第  $i$  次试验时感官评价分数;  $d_{\min}$  为感官评价分数最小值;  $d_{\max}$  为感官评价分数最大值;  $W_i$  为第  $i$  次蒸煮损失归一化值;  $w_i$  为第  $i$  次试验蒸煮损失测量值;  $w_{\min}$  为蒸煮损失测量最小值;  $w_{\max}$  为蒸煮损失测量最大值;  $E_i$  为第  $i$  次色差归一化值;  $e_i$  为第  $i$  次色差测量值;  $e_{\min}$  为色差测量最小值;  $e_{\max}$  为色差测量最大值。

### 1.3.9 GC-IMS 分析

两种样品各取 2 g 鸡丁样品, 置于 20 mL 顶空瓶中, 密封, 编号, 60°C 孵育 15 min 后进样, 每个样品做 3 组平行。两种样品处理后, 进样气体体积均为 500  $\mu$ L, 进样针温度 65°C, 孵化转速 500 r/min。

GC-IMS 条件: 使用 MXT-5 金属毛细管气相色谱柱 (15 m $\times$ 0.53 mm, 1  $\mu$ m), 色谱柱温度 60°C。载气为  $N_2$ (纯度  $\geq 99.999\%$ ), 载气时间为 20 min, 载气流速: 0~2 min, 保持 2 mL/min; 2~20 min, 由 2 mL/min 线性升高至 100 mL/min。漂移气流速保持 150 mL/min, IMS 温度 45°C。

### 1.3.10 相对气味活度值法分析

参照刘登勇等<sup>[12]</sup>的相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)法对炒制和微波烹饪宫保鸡丁的挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)贡献大小进行评价。当  $ROAV \geq 1$  时, 则该 VOC 为分析样品的关键风味化合物, ROAV 越大则表示对样品整体风味贡献度越大; 当  $0.1 \leq ROAV < 1$  时, 则该 VOC 对样品整体风味起修饰作用<sup>[13]</sup>。定义对宫保鸡丁样品整体风味贡献最大的组分  $ROAV_{\text{stan}}$  为 100, 其他组分  $ROAV_i$  计算公式(7)如下:

$$ROAV_i = 100 \times \frac{C_i}{T_i} \times \frac{T_{\text{stan}}}{C_{\text{stan}}} \quad (7)$$

式中,  $C_i$  和  $T_i$  为各 VOC 的相对百分含量(%)及香气阈值( $\mu$ g/kg);  $T_{\text{stan}}$  和  $C_{\text{stan}}$  为对样品整体风味贡献最大 VOC 的香气阈值( $\mu$ g/kg)和相对百分含量(%)。

## 1.4 数据处理

利用 FlavourSpec® 风味分析仪的 VOCal 及 Reporter、Gallery Plot 插件分析数据, 由内置的 GC $\times$ library Search

NIST 数据库和 IMS 数据库可对两个样品的风味成分进行定性分析。其余试验所得数据由 Excel 2019、SPSS 22.0 进行统计分析, 由 Origin Pro 2018 进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果与分析

#### 2.1.1 醋添加量对宫保鸡丁的影响

醋在烹饪中有增香、嫩肉、提味等作用。醋添加量在 12 g 时感官评分达到最大值 72.4。随着醋添加量增加, 色差值  $\Delta E$  先降低后略有上升, 在 10 g 时达到最低为 3.55, 与炒制宫保鸡丁颜色接近。酸添加量的增加普遍会导致肉制品的亮度和红度降低, 可能是因为受醋酸影响, 肉中的氧气含量降低, 鲜红色的肌红蛋白向棕色的高铁肌红蛋白转变<sup>[14]</sup>。蒸煮损失与肉类的保水性和嫩度密切相关<sup>[15]</sup>, 蒸煮损失在醋添加量为 10 g 时达到最大 25.15%。醋添加量增加会降低 pH, 酸对肌肉组织结构的破坏作用及肌浆蛋白的沉淀导致肉保水性下降; 肉的 pH 降低, 则肌肉蛋白的正电荷增加, 产生的渗透压使肌肉蛋白水和能力加强, 从而对热变形相关的特性变化有抑制作用<sup>[14,16]</sup>。综合考虑感官评分、蒸煮损失和色差  $\Delta E$ , 选取醋添加量 10、12、14 g 进行正交优化试验。

#### 2.1.2 淀粉添加量对宫保鸡丁品质的影响

添加淀粉是实现肉类嫩化的方法之一, 添加适量淀粉对保持肉制品的持水力、改善肉制品口感有一定作用, 同时可提高产品出品率。水淀粉添加量为 10 g 时, 感官评分最高, 此时鸡丁肉质嫩滑、明亮光泽。水淀粉添加量较少时, 鸡丁肉质较硬; 水淀粉添加量较多时, 鸡丁较黏稠, 感官品质降低。鸡肉  $\Delta E$  随着水淀粉添加量增加逐渐大, 鸡肉亮度、红度均逐渐变小。在水淀粉添加量范围为 6~12 g 时, 蒸煮损失逐渐降低, 而超过 12 g 时, 蒸煮损失增大。添加不同量的淀粉对鸡肉系水力影响不同, 而水淀粉的过量添加, 会影响颗粒的流动性, 黏稠度增大, 持水性降低<sup>[17]</sup>。综上所述, 选取水淀粉添加量为 8、10、12 g 进行正交优化试验。

#### 2.1.3 微波功率对宫保鸡丁品质的影响

微波功率影响热量转化, 微波功率越大, 加热速度越快。随着微波功率的增加, 感官分数先上升后下降, 在微波功率为 595 W 时, 感官评分达到最高。微波功率小于 462 W 时, 鸡肉呈现未完全熟透、或刚刚熟透的状态; 功率过大会使鸡丁失水过多, 肉质僵硬、口感粗糙, 导致感官分值有所下降。随着微波功率增大, 鸡丁内部的升温速度加快, 蛋白质变性、聚集, 肌肉间隙的自由水和部分结合水吸收微波能迅速蒸发, 鸡丁蒸煮损失逐渐增大<sup>[18]</sup>。鸡丁的亮度、红度及  $\Delta E$  随着微波功率的增加逐渐降低, 在微波功率为 700 W 时最接近炒制宫保鸡丁。综上所述, 选取微波功率 462、595、700 W 进行正交优化试验。

### 2.1.4 微波时间对宫保鸡丁品质的影响

微波菜肴品质通常与微波时间密切相关。微波 6 min 时, 感官评分达到最高 65.0。在 4 min 时鸡肉未完全熟透, 在 5~6 min 时, 鸡丁熟透, 且肉质较嫩、色泽棕红, 光泽较明亮; 在 6 min 后感官评分降低, 鸡丁肉质变柴, 组织表层肉质老化。随着微波时间增加, 水吸收微波能迅速蒸发, 蒸煮损失增大。鸡丁色差  $\Delta E$  随着加热时间的延长先下降后上升, 在 6 min 时达到极大值, 超过 6 min 后又略有降低, 故短时间内鸡肉的色泽不呈规律变化。综上所述, 选取 5、6、7 min 进行正交优化试验。

## 2.2 正交试验结果

在单因素试验基础上, 采用  $L_9(3^4)$  正交表对宫保鸡丁微波烹饪工艺进行优化, 结果见表 3。由表 3 极差分析可知, 以综合评分为考查指标, 微波烹饪工艺影响宫保鸡丁品质的因素排序为  $D>B>C>A$ , 最优组合为  $A_2B_2C_3D_1$ , 即醋添加量为 12 g, 水淀粉添加量为 10 g, 微波功率为 700 W, 微波时间为 5 min。进行验证试验得出宫保鸡丁感官评分得分为  $78.67\pm 1.53$ , 蒸煮损失为  $18.61\%\pm 1.18\%$ , 色差为  $10.55\pm 0.40$ , 综合评分  $0.70\pm 0.05$ , 与正交试验中最优结果接近, 故可认为  $A_2B_2C_3D_1$  是最优配方。

表 3 宫保鸡丁微波烹饪工艺正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal experiment for Kung Pao chicken cooked by microwave

序号	因素				综合评分
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	0.52
2	1	2	2	2	0.30
3	1	3	3	3	0.41
4	2	1	2	3	0.33
5	2	2	3	1	0.75
6	2	3	1	2	0.17
7	3	1	3	2	0.20
8	3	2	1	3	0.46
9	3	3	2	1	0.22
$K_1$	1.23	1.05	1.15	1.49	
$K_2$	1.25	1.51	0.85	0.67	
$K_3$	0.88	0.80	1.37	1.20	
$k_1$	0.41	0.35	0.38	0.50	
$k_2$	0.42	0.50	0.28	0.22	
$k_3$	0.29	0.27	0.46	0.40	
R	0.13	0.23	0.18	0.28	
因素主次	$D>B>C>A$				
最优方案	$A_2B_2C_3D_1$				

## 2.3 炒制与微波宫保鸡丁 GC-IMS 挥发性物质分析

### 2.3.1 炒制与微波宫保鸡丁挥发性成分谱图分析

图 2 为利用 Reporter 插件制作的炒制和微波烹饪宫保鸡丁样品的差异谱图, 选取炒制宫保鸡丁作为参比, 微波烹饪宫保鸡丁扣减参比, 得到二者的差异谱图。在微波宫保鸡丁的差异谱图中, 红色斑点说明该 VOC 高于参比样品, 如图中 a 区域; 蓝色斑点说明该 VOC 低于参比样品, 如图中 b 区域所示。炒制宫保鸡丁的大部分挥发性物质含量高于微波烹饪的宫保鸡丁, 而微波宫保鸡丁部分挥发性风味物质含量高于炒制烹饪。

### 2.3.2 炒制与微波宫保鸡丁挥发性成分指纹图谱分析

图 3 为两种烹饪方式宫保鸡丁样品的 VOCs 指纹图谱。图中黄框区和红框区分别代表炒制和微波烹饪宫保鸡丁相对含量较高的 VOCs。由图 3 可看出, 炒制宫保鸡丁的风味物质更丰富, 丁二酸二乙酯、 $\gamma$ -壬内酯、乙酸异戊酯、乳酸乙酯、乙酸异丁酯、乙酸乙酯、2,5-二甲基吡嗪、1,8-桉叶素、二烯丙基二硫醚、壬醛、辛醛、庚醛、戊醛、E-2-庚烯醛、E-2-己烯醛、甲硫基丙醛、苯乙醛、苯甲醛、3-甲基丁醛等物质的浓度均高于微波烹饪的宫保鸡丁; 微波宫保鸡丁中芳樟醇、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、 $\beta$ -罗勒烯、Z-罗勒烯、柠檬烯、2-萜烯、 $\beta$ -蒎烯、蒎烯、 $\alpha$ -蒎烯、己醛等物质的含量稍高一些。醛类、醇类和酮类是炒制和微波烹饪宫保鸡丁共同的主要特征性风味物质的种类, 主要是鸡肉经过高温烹饪发生美拉德反应和脂肪氧化<sup>[19]</sup>, 这与 MOTTRAM<sup>[20]</sup>的研究结果相一致, 但萜烯类风味化合物在微波宫保鸡丁中更为丰富。

### 2.3.3 炒制与微波宫保鸡丁挥发性成分定性分析

结合表 4 和图 3, 2 种样品共鉴定出 60 种 VOCs, 其中 57 种可以准确定性, 包括 19 种醛类、8 种醇类、7 种酮类、12 种萜烯类、6 种酯类、含硫化合物和杂环类均为 2 种、酚类 1 种。

醛类主要来源于不饱和脂肪酸的氧化, 其挥发性强且阈值较低, 对宫保鸡丁风味有显著贡献作用<sup>[21-22]</sup>。两种样品检测出的醛类中, 微波宫保鸡丁中的苯甲醛、甲硫基丙醛、庚醛、糠醛、己醛、丁醛相对含量更高, 其余醛类物质相对含量均低于炒制宫保鸡丁。其中, 饱和醛包括己醛、丁醛、壬醛、辛醛、庚醛、戊醛, 烯醛包括 E-2-庚烯醛(单体和二聚体)、E-2-己烯醛(单体和二聚体), 是鸡肉脂肪经加热后特有的风味物质, 对鸡肉风味起重要作用<sup>[23]</sup>。3-甲基丁醛主要来源于 Strecker 降解, 而已醛是由亚油酸降解形成的, 呈油脂气味, 由于其具有较低的香气阈值, 为鸡肉重要的风味物质<sup>[24-25]</sup>。糠醛和糠醛二聚体的相对含量较高, 赋予宫保鸡丁焦糖香味<sup>[26]</sup>。

大多数醇类化合物是由蛋白质水解、脂质氧化及香料带入产生。炒制宫保鸡丁样品中 1,8-桉叶素(单体和二聚体)、2-丙醇相对含量较高, 而微波宫保鸡丁中芳樟醇相对含量较高。1,8-桉叶素有薄荷香气和清凉的草药味, 主要来自加工过程中醋和花椒的固有成分引入<sup>[27-28]</sup>; 芳樟醇味辛冷, 有清香味, 像樟脑气味, 由辣椒、花椒等带入<sup>[29-30]</sup>。

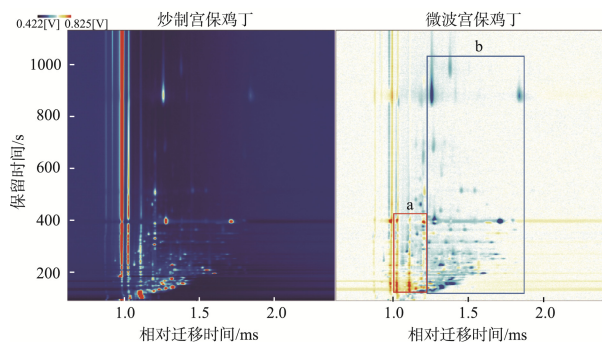


图 2 炒制和微波宫保鸡丁的 GC-IMS 二维差异谱图

Fig.2 GC-IMS two-dimensional differential spectrum of Kung Pao chicken cooked by stir-frying and microwave

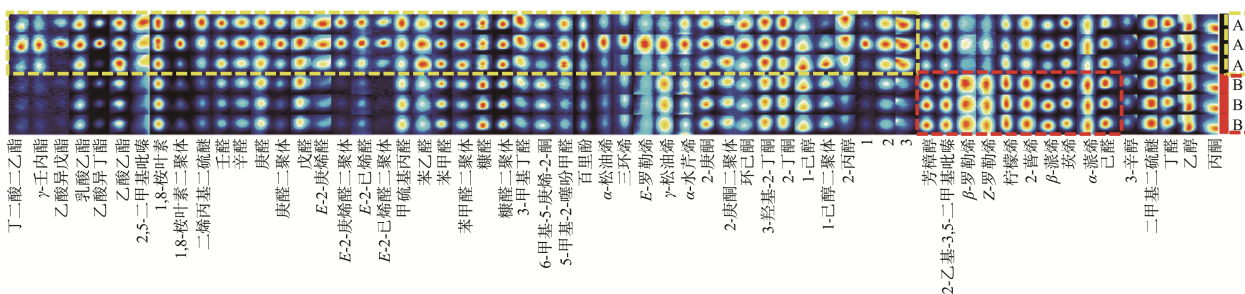
酮类物质是由美拉德反应以及热降解产生, 阈值一般较高, 可作为中间产物形成杂环化合物, 其性质稳定、香气持久, 一般带有花香气味, 对肉香形成有不可忽视的贡献<sup>[31]</sup>。3-羟基-2-丁酮、2-丁酮在微波宫保鸡丁中相对含量较高, 3-羟基-2-丁酮是美拉德反应的前驱物<sup>[32]</sup>, 对宫保鸡丁风味的形成和增强有一定的贡献, 且在食醋、料酒、花椒等调味料中均有检出, 有强烈的脂肪样香气、奶油气味; 6-甲基-5-庚烯-2-酮带有青香、木香、果香; 2-丁酮和 2-庚酮对肉制品的挥发性风味产生重要影响, 对消减腥味具有一定的贡献<sup>[13]</sup>。

萜烯类化合物是宫保鸡丁挥发性风味物质中种类较

多的物质, 来源于烹饪过程中香辛料的加入以及脂肪酸烷基自由基的均裂, 其 VOCs 香气阈值较高, 对鸡丁风味的贡献一般不大。柠檬烯、 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、 $\beta$ -罗勒烯为花椒的主要香气成分<sup>[29]</sup>;  $\gamma$ -松油烯、柠檬烯、罗勒烯、 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯在辣椒中也均有检出<sup>[30]</sup>。微波烹饪宫保鸡丁中柠檬烯、2-萜烯、 $\beta$ -蒎烯、茨烯相对含量均高于炒制宫保鸡丁, 可能是因为在微波的作用下, 脂肪酸次级氧化反应速度快, 微波加热的油脂在高温下产生了更多的二次产物, 香辛料产生的挥发性香气成分更多<sup>[33-34]</sup>。

酯类化合物主要由对应的酸和醇反应生成, 也和烹饪过程中调味料的加入有关。GC-IMS 检测出的酯类物质共 6 种, 其中炒制宫保鸡丁中的乙酸乙酯、乙酸异戊酯、乳酸乙酯、 $\gamma$ -壬内酯和丁二酸二乙酯相对含量均高于微波宫保鸡丁。乙酸乙酯具有果香酒香, 与烹饪过程中料酒、酱油、醋的加入, 以及高温烹饪反应生成有关<sup>[35]</sup>。乙酸乙酯、 $\gamma$ -壬内酯、乙酸异戊酯在醋中均有检出; 乙酸乙酯、丁二酸二乙酯和乳酸乙酯也是构成黄酒芳香主体的来源之一<sup>[36]</sup>。

两种样品中均检出两种含硫化合物, 两种杂环类化合物及 1 种酚类。含硫化合物可能由辣椒、大葱、大蒜提供, 且二烯丙基二硫醚是葱和蒜的特征香气成分<sup>[37-38]</sup>。杂环类中的吡嗪类物质大多是由己醛基和氨基酸的缩合反应生成, 此类物质大部分具有焙烤、焦香气味<sup>[39-40]</sup>。



注: 纵向标识 A、B 分别表示炒制宫保鸡丁和微波宫保鸡丁; 数字 1~3 表示未定性的挥发性有机化合物。

图 3 炒制和微波宫保鸡丁的 VOCs 指纹图谱

Fig.3 Fingerprints of VOCs in Kung Pao chicken cooked by stir-frying and microwave

### 2.3.4 炒制与微波宫保鸡丁挥发性成分峰强度对比分析

在 GC-IMS 结果分析中, 同一种风味物质的特征峰强度越大, 该物质在样品中的含量越高。本研究中由于不同样品含有的 VOCs 总量并不一致, 对样品中 VOCs 含量分析使用峰强度对比较为合理<sup>[41]</sup>。由图 4 可知, 炒制和微波两种烹饪方式的宫保鸡丁主要风味物质均为醛类、醇类、酮类, 炒制的宫保鸡丁总体风味物质总峰强度相对较高, 除萜烯类外, 醛类、醇类、酮类、酯类、含硫化合物、杂环类、酚类的总峰强度皆高于微波烹饪的宫保鸡丁, 可能是因为在烹饪过程中炒制宫保鸡丁烹饪温度更高, 美拉德反应和脂肪氧化进行更为剧烈, 而微波烹饪时间、烹饪温度相对较低, 对于香辛料的香气保留较好, 且这可能和微波介电感应加热方式有关, 脂肪酸次级氧化反应速度在微波场中更快, 油脂在高温下产生了更多的二次产物。

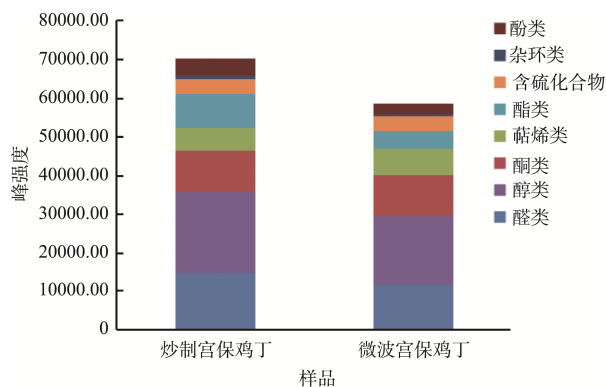


图 4 炒制和微波宫保鸡丁 VOCs 含量差异图

Fig.4 Difference diagram of VOCs content of Kung Pao chicken cooked by stir-frying and microwave

表 4 宫保鸡丁挥发性风味物质定性和定量分析  
Table 4 Qualitative and quantitative analysis of VOCs in Kung Pao chicken

化合物名称	CAS 号	保留指数	保留时间 /s	迁移时间 /ms
醛类				
壬醛	C124196	1112.50	507.42	1.47767
5-甲基-2-噁吩甲醛	C13679704	1112.50	507.54	1.56285
苯乙醛	C122781	1042.60	406.92	1.25651
辛醛	C124130	1008.30	357.68	1.40355
苯甲醛	C100527	963.40	313.2	1.15026
苯甲醛二聚体	C100527	964.00	313.69	1.47139
E-2-庚烯醛	C18829555	959.60	310.04	1.25731
E-2-庚烯醛二聚体	C18829555	958.70	309.32	1.6719
甲硫基丙醛	C3268493	909.80	268.75	1.08999
庚醛	C111717	904.40	264.3	1.32876
庚醛二聚体	C111717	905.20	264.94	1.70464
糠醛	C98011	829.40	222.68	1.08229
糠醛二聚体	C98011	830.00	223	1.33338
E-2-己烯醛	C6728263	848.40	232.21	1.1855
E-2-己烯醛二聚体	C6728263	849.10	232.53	1.52132
己醛	C66251	790.80	203.299	1.56907
戊醛	C110623	685.70	162.63	1.42889
3-甲基丁醛	C590863	643.50	153.099	1.40887
丁醛	C123728	559.10	134.035	1.29333
醇类				
芳樟醇	C78706	1107.30	499.98	1.22225
1,8-桉叶素	C470826	1030.60	389.76	1.295
1,8-桉叶素二聚体	C470826	1030.50	389.51	1.72467
3-辛醇	C3391864	988.30	333.86	1.16082
1-己醇	C111273	875.70	245.87	1.32568
1-己醇二聚体	C111273	875.00	245.56	1.63994
2-丙醇	C67630	521.10	125.457	1.21323
乙醇	C64175	418.40	102.263	1.1362
酮类				
6-甲基-5-庚烯-2-酮	C110930	997.20	341.64	1.18343
2-庚酮	C110430	895.20	256.68	1.26252
2-庚酮二聚体	C110430	894.90	256.36	1.63531

表 4(续)

化合物名称	CAS 号	保留指数	保留时间 /s	迁移时间 /ms
环己酮	C108941	897.50	258.58	1.14699
3-羟基-2-丁酮	C513860	703.40	168.985	1.33338
2-丁酮	C78933	542.20	130.223	1.2502
丙酮	C67641	473.20	114.654	1.11464
萜烯类				
$\gamma$ -松油烯	C99854	1066.10	440.81	1.22575
E-罗勒烯	C3779611	1057.20	428.03	1.22283
柠檬烯	C138863	1025.80	382.81	1.22283
$\alpha$ -松油烯	C99865	1017.30	370.55	1.22593
$\alpha$ -水芹烯	C99832	1007.80	356.89	1.22266
2-萹烯	C554610	998.80	344.02	1.22398
$\beta$ -蒎烯	C127913	977.60	325.02	1.22266
蒎烯	C79925	950.40	302.46	1.2174
$\alpha$ -蒎烯	C80568	935.90	290.39	1.22134
三环烯	C508327	928.00	283.86	1.22398
$\beta$ -罗勒烯	C13877913	1048.20	414.953	1.21724
Z-罗勒烯	C3338554	1039.10	401.908	1.22332
酯类				
$\gamma$ -壬内酯	C104610	1433.50	969.19	1.39803
丁二酸二乙酯	C123251	1225.90	670.63	1.28948
乙酸异戊酯	C123922	878.80	247.46	1.75239
乳酸乙酯	C97643	809.10	212.513	1.54135
乙酸异丁酯	C110190	763.00	191.861	1.62145
乙酸乙酯	C141786	581.60	139.119	1.34109
含硫化合物				
二甲基二硫醚	C624920	731.50	179.788	0.98986
二烯丙基二硫醚	C2179579	1075.70	454.53	1.20429
杂环类				
2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	C13925070	1088.20	472.58	1.22225
2,5-二甲基吡嗪	C123320	917.80	275.42	1.11156
酚类				
百里酚	C89838	1361.00	864.88	1.27942

2.3.5 炒制与微波宫保鸡丁关键风味化合物 ROAV 鉴定

VOCs 相对含量和峰强度大小不能说明其对宫保鸡丁风味的贡献度, 故还应结合香气阈值进行鉴定。3-甲基丁醛在两种样品中相对含量较高, 香气阈值为 0.4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , 对宫保鸡丁风味贡献最大, 故定义 3-甲基丁醛为对整体风味

贡献最大的 VOC。如表 5 所示, 两种烹饪方式宫保鸡丁的关键风味化合物比较丰富, 炒制和微波宫保鸡丁的关键风味化合物分别有 19 和 20 种, 其中醛类风味贡献度最大。按照贡献度由大到小进行排列, 炒制宫保鸡丁主要风味化合物类别依次为醛类、酯类、醇类、萜烯类, 而微波宫保鸡丁则为醛类、萜烯类、醇类、酯类; 炒制宫保鸡丁关键风味化合物分别为 3-甲基丁醛、甲硫基丙醛、乙酸乙酯、茨烯、己醛、壬醛、二甲基二硫醚、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、3-羟基-2-丁酮、1,8-桉叶素、辛醛、芳樟醇、丁醛、5-甲基-2-噻吩甲醛、1,8-桉叶素二聚体、柠檬烯、苯乙醛、庚醛、庚醛二聚体; 微波宫保鸡丁的关键风味化合物分别为: 3-甲基丁醛、甲硫基丙醛、乙酸乙酯、茨烯、己醛、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、二甲基二硫醚、芳樟醇、3-羟基-2-丁酮、壬醛、丁醛、1,8-桉叶素、辛醛、柠檬烯、5-甲基-2-噻吩甲醛、1,8-桉叶素二聚体、庚醛、苯乙醛、 $\alpha$ -蒎烯、戊醛。在两种烹饪方式的关键风味化合物中, 乙酸乙酯、1,8-桉叶素二聚体、庚醛二聚体的香气对微波宫保鸡丁的贡献率均低于炒制宫保鸡丁的样品, 其他关键风味化合物的贡献率均高于炒制宫保鸡丁。由此可知, 两种样品的关键风味化合物种类相似, 但贡献度有所差别, 故两种样品风味差异明显。

表 5 炒制和微波宫保鸡丁 VOCs 阈值及 ROAV  
Table 5 Threshold values and ROAVs of VOCs in Kung Pao chicken cooked by stir-frying and microwave

化合物名称	阈值 [42-43]/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	ROAV	
		炒制宫保鸡丁	微波宫保鸡丁
壬醛	1	8.44	9.25
5-甲基-2-噻吩 甲醛	1	4.24	4.65
苯乙醛	4	1.42	1.83
辛醛	0.7	5.76	6.27
E-2-庚烯醛	5	0.94	0.79
E-2-庚烯醛 二聚体	5	0.54	0.28
甲硫基丙醛	0.04	49.69	77.85
庚醛	3	1.38	2.01
庚醛二聚体	3	1.06	0.80
E-2-己烯醛	17	0.11	0.12
己醛	4.5	8.95	17.94
戊醛	12	0.71	1.01
3-甲基丁醛	0.4	100	100
丁醛	9	4.95	8.13
6-甲基-5-庚烯 -2-酮	50	0.15	0.25
2-庚酮	9	0.26	0.44
2-庚酮二聚体	9	0.21	0.33
3-羟基-2-丁酮	7	6.33	9.89
芳樟醇	6	5.08	11.95

表 5(续)

化合物名称	阈值 [42-43]/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	ROAV	
		炒制宫保鸡丁	微波宫保鸡丁
1,8-桉叶素	15	5.78	7.70
1,8-桉叶素 二聚体	15	3.06	2.44
3-辛醇	35	0.11	0.18
2-丙醇	40	0.76	0.61
柠檬烯	10	1.93	4.86
$\alpha$ -水芹烯	40	<0.1	0.15
2-蒎烯	37	0.33	0.74
$\beta$ -蒎烯	140	0.12	0.3
茨烯	2.2	10.88	18.89
$\alpha$ -蒎烯	6	0.73	1.42
$\beta$ -罗勒烯	34	<0.1	0.14
$\gamma$ -壬内酯	65	0.17	0.12
丁二酸二乙酯	15	0.47	0.41
乙酸异戊酯	2	0.39	0.28
乙酸异丁酯	66	0.18	0.13
乙酸乙酯	5	22.07	20.27
2-乙基-3,5-二甲 基吡嗪	1	6.75	13.51
二甲基二硫醚	7.6	7.22	13.05
二烯丙基二硫醚	30	0.37	0.31

### 3 结 论

宫保鸡丁最佳微波最佳加工工艺参数为醋添加量为 12 g, 水淀粉添加量为 10 g, 微波功率为 700 W, 微波时间为 5 min, 此条件下宫保鸡丁色泽棕红、较为明亮, 糖醋味较浓, 鸡丁肉质较嫩, 综合评分为  $0.70 \pm 0.05$ 。通过 GC-IMS 分析发现, 不同烹饪方式对宫保鸡丁挥发性物质的影响差异较大, 炒制的宫保鸡丁风味物质较微波宫保鸡丁更为丰富; 炒制和微波宫保鸡丁的关键风味物质相似, 其共有的关键风味化合物包括 3-甲基丁醛、甲硫基丙醛、乙酸乙酯、茨烯、己醛、壬醛、二甲基二硫醚、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、3-羟基-2-丁酮、1,8-桉叶素等 18 种, 但贡献度差别明显。本研究为宫保鸡丁的规模化、产业化生产提供一定理论依据, 宫保鸡丁关键风味物质的形成机理和途径研究提供参考依据。

### 参考文献

- [1] 韦佩贝, 戚穗坚. 疫情全球化常态化趋势下中国预制调理食品市场发展现状[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 18-25.  
WEI PB, QI SJ. Market development status of Chinese prepared food under the globalized epidemic trends [J]. Food Mach, 2020, 36(9): 18-25.



- [2] 王娟, 高群玉, 姜文勇. 我国预制菜行业的发展现状及趋势[J/OL]. 现代食品科技: 1-5. [2022-08-17]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.0388>
- WANG J, GAO QY, LOU WY. The development status and trend of ready meal industry in China [J/OL]. *Mod Food Sci Technol*: 1-5. [2022-08-17]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.0388>
- [3] 任思婕. 微波辣子鸡丁的加工及气调保鲜工艺的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- REN SJ. Processing of spicy chili chicken grain by microwave and its fresh keeping by modified atmosphere packaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [4] 沈艳奇. 低温真空油炸小黄花鱼调理食品的研制[D]. 锦州: 渤海大学, 2019.
- SHEN YQ. Development of ready-to-eat small yellow croaker by low temperature vacuum frying [D]. Jinzhou: Bohai University, 2019.
- [5] 卢雪松. 宫保鸡丁烹饪工艺参数优化[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- LU XS. The diced chicken with peanuts cuisine optimization of parameters [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [6] 任红涛, 程丽英, 张剑, 等. 速冻菜肴宫保鸡丁的工艺研究[J]. 农产品加工(学刊), 2011, (12): 14-17.
- REN HT, CHENG LY, ZHANG J, *et al.* Technology of frozen diced chicken with paprika [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2011, (12): 14-17.
- [7] 马瑞芬, 宋照军, 董建国, 等. 超高压处理对生鲜调理宫保鸡丁品质的影响[J]. 食品工业, 2013, 34(5): 93-96.
- MA RF, SONG ZJ, DONG JG, *et al.* Effects of ultra-high pressure treatments on the qualities of fresh prepared Kung-pao chicken [J]. *Food Ind*, 2013, 34(5): 93-96.
- [8] 曾庆孝. 食品加工与保藏原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- ZENG QX. Principles of food processing and preservation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [9] RALUCA PT, TATIANA DP, ARABELA EU, *et al.* Effects of supplementing grape pomace to broilers fed polyunsaturated fatty acids enriched diets on meat quality [J]. *Animals*, 2020, 10(6): 947.
- [10] ANA CPV, ANA G, PABLO G, *et al.* Effect of active-edible coating and essential oils on lamb patties oxidation during display [J]. *Foods*, 2021, 10(2): 263.
- [11] 杨永华. 定量卤制牛肉干制备工艺配方优化及品质特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- YANG YH. Study on the process formulation optimization and quality characteristics of beef jerky by quantitative bittern processing [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [12] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法:“ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370-374.
- LIU DY, ZHOU GH, XU XL. “ROAV” method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham [J]. *Food Sci*, 2008, 29(7): 370-374.
- [13] 杜晓兰, 杨文敏, 黄永强, 等. 基于顶空气相离子迁移谱比较 3 种加工方式对番鸭肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 269-275.
- DU XL, YANG WM, HUANG YQ, *et al.* Effects of three processing methods on volatile flavor compounds of muscovy duck meat as investigated by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Sci*, 2021, 42(24): 269-275.
- [14] 于小斐, 魏文松, 艾鑫, 等. 有机酸处理对肉类品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(14): 387-393.
- YU XF, WEI WS, AI X, *et al.* Research progress on the effect of organic acid treatment on meat quality [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(14): 387-393.
- [15] 王可, 祝超智, 赵改名, 等. 乳酸嫩滑牛肉的工艺优化[J]. 肉类研究, 2019, 33(4): 13-18.
- WANG K, ZHU CZ, ZHAO GM, *et al.* Process optimization for yak meat tenderization by lactic acid [J]. *Meat Res*, 2019, 33(4): 13-18.
- [16] 陈星. 酸辣猪肉干加工工艺及产品特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- CHEN X. Study on the processing technology and product characteristics of acid/hot pork jerky [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [17] 许美玉, 何丹, 宋洪波, 等. 真空滚揉-超高压制备调理鸡胸肉工艺优化[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 171-177.
- XU MY, HE D, SONG HB, *et al.* Optimization of vacuum tumbling combined ultra high-pressure treatment preparation of conditioned chicken breast [J]. *Food Mach*, 2020, 36(8): 171-177.
- [18] 李思宁, 唐善虎, 郝刚, 等. 微波加热处理对牦牛肉加热损失率、嫩度及微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 45-50.
- LI SN, TANG SH, HAO G, *et al.* Effect of microwave heating on heating loss rate, tenderness and microstructure of yak meat [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(11): 45-50.
- [19] 崔晓莹, 张庆永, 刘登勇, 等. 德州扒鸡关键挥发性风味物质分析[J]. 肉类研究, 2019, 33(11): 50-54.
- CUI XY, ZHANG QY, LIU DY, *et al.* Analysis of key flavor substances in Dezhou braised chicken [J]. *Meat Res*, 2019, 33(11): 50-54.
- [20] MOTTRAM DS. Flavour formation in meat and meat products: A review [J]. *Food Chem*, 1998, 629(4): 415-424.
- [21] HOA VB, TOUSEEF A, INHO H. Significant influence of particular unsaturated fatty acids and pH on the volatile compounds in meat-like model systems [J]. *Meat Sci*, 2013, 94(4): 480-488.
- [22] CUI H, LIU D, XIA X, *et al.* Flavor and texture characteristics of microwave cooked Kung Pao chicken by different heat conduction effects and further aroma improvement with moderate enzymatic hydrolyzed chicken fat [J]. *Food Funct*, 2021, 12: 1547-1557.
- [23] 王军喜, 叶俊杰, 赵文红, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 OAV 分析酱油鸡特征风味活性物质的研究[J]. 中国调味品, 2020, 45(9): 160-164.
- WANG JX, YE JJ, ZHAO WH, *et al.* Identification of characteristic flavor active compounds in soy sauce marinated chicken by HS-SPME-GC-MS and odor activity value (OAV) [J]. *China Cond*, 2020, 45(9): 160-164.
- [24] ZHANG J, WANG Y, PAN DD, *et al.* Effect of black pepper essential oil on the quality of fresh pork during storage [J]. *Meat Sci*, 2016, 117: 130-136.
- [25] WEI C, NI Z, THAKURA K, *et al.* Aromatic effects of immobilized enzymatic oxidation of chicken fat on flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) derived Maillard reaction products [J]. *Food Chem*, 2020, 306: 125560.

- [26] 戴艳军, 王纯, 鲍雨婷, 等. 苦荞脆片加工工艺优化及其挥发性成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 161–169.  
DAI YJ, WANG C, BAO YT, *et al.* Optimization of processing technology and analysis of volatile components of tartary buckwheat chips [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(17): 161–169.
- [27] GONG YW, HUANG YF, ZHOU LG, *et al.* Chemical composition and antifungal activity of the fruit oil of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim (Rutaceae) from China [J]. *J Essent Oil Res*, 2009, 21(2): 174–178.
- [28] 刘廷锐. 四川麸醋关键风味物质及其与酿造微生物的相关性研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.  
LIU TR. Study on key flavor substances of sichuan bran vinegar and their correlation with brewing microorganisms [D]. Chengdu: Xihua University, 2020.
- [29] 王娟, 杜静怡, 贾雪颖, 等. 花椒精油及其水提物的香气活性成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 229–241.  
WANG J, DU JY, JIA XY, *et al.* Characterization of the aroma-active compounds in essential oil and water extract of *Zanthoxylum bungeanum* pericarp [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(20): 229–241.
- [30] 杨慧, 黄绿红, 张帆, 等. 基于感官和气相色谱-离子迁移谱分析油温对辣椒油风味的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 328–334.  
YANG H, HUANG LH, ZHANG F, *et al.* Analysis of the effect of oil temperature on the flavor of chili oil based on sensory and gas chromatography ion mobility spectrometry [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(9): 328–334.
- [31] LI X, ZHU J, QI J, *et al.* Superchilled storage ( $-2.5\pm 1^\circ\text{C}$ ) extends the retention of taste-active and volatile compounds of yellow-feather chicken soup [J]. *Anim Sci J*, 2018, 89(6): 1–13.
- [32] 臧明伍, 张凯华, 王守伟, 等. 基于 SPME-GC-O-MS 的清真酱牛肉加工过程中挥发性风味成分变化分析[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 117–121.  
ZANG MW, ZHANG KH, WANG SW, *et al.* Changes in volatile flavor components during the processing of islamic spiced beef analyzed by solid phase micro-extraction coupled with gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry (SPME-GC-O-MS) [J]. *Food Sci*, 2016, 37(12): 117–121.
- [33] 赵仔影. 发酵型烤肉酱的开发研究[D]. 成都: 成都大学, 2021.  
ZHAO ZY. Development of fermented barbecue sauce [D]. Chengdu: Chengdu University, 2021.
- [34] JUKKA-PEKKA S, MARKO T, HEIKKI K. Effects of microwave vs. Convection oven heating on the formation of oxidation products in canola (*Brassica rapa* subspecies *oleifera*) oil [J]. *Ocl Oils Fat Crop Lipids*, 2017, 24(3): A301–A305.
- [35] 陈杰, 赵莹, 韩舜羽, 等. 17 种市售广式酱油中风味物质的检测分析[J]. 中国酿造, 2021, 40(12): 165–170.  
CHEN J, ZHAO Y, HAN SY, *et al.* Detection and analysis of flavor substances in 17 kinds of commercially available Cantonese soy sauce [J]. *China Brew*, 2021, 40(12): 165–170.
- [36] 阎文飞, 郭瑞, 朱丹, 等. HS-SPME-GC-MS 法分析即墨黄酒陈酿过程中香气成分的变化[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 234–241.  
YAN WF, GUO R, ZHU D, *et al.* Analysis of aroma components in Jimo yellow rice wine during aging by HS-SPME-GC-MS [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2019, 19(5): 234–241.
- [37] 田震, 徐亚元, 李大婧, 等. 基于 SPME-GC-MS 分析不同干燥方式对香葱挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 232–244.  
TIAN Z, XU YY, LI DJ, *et al.* Analysis of volatile components in dried chives by SPME-GC-MS [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(4): 232–244.
- [38] 郭思文, 王丹, 赵晓燕, 等. 不同颜色蒜泥的风味及挥发性物质分析[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 256–262.  
GUO SW, WANG D, ZHAO XY, *et al.* Analysis of the flavor and volatile components of crushed garlic cloves with different colors [J]. *Food Sci*, 2019, 40(22): 256–262.
- [39] ROKUGAWA H, FUJIKAWA H. Evaluation of a new maillard reaction type time-temperature integrator at various temperatures [J]. *Food Control*, 2015, 57: 355–361.
- [40] 冯涛, 田怀香, 陈福玉. 食品风味化学[M]. 北京: 中国质检出版社, 2013.  
FENG T, TIAN HX, CHEN FY. Food flavor chemistry [M]. Beijing: China Quality and Standards Press, 2013.
- [41] 安攀宇, 李雯昕, 李艳梅, 等. 美拉德反应制备鸡肉风味基料的工艺条件优化[J]. 核农学报, 2021, 35(10): 2328–2340.  
AN PY, LI XX, LI YM, *et al.* Optimization of processing conditions for preparing chicken flavor basic material by Maillard reaction [J]. *J Nucl Agric Sci*, 2021, 35(10): 2328–2340.
- [42] 孙宝国. 食用调香术: 第三版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.  
SUN BG. The technology of food flavoring: The 3rd edition [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [43] BURDOCK GA. Fenaroli's handbook of flavor ingredients: The 6th edition [M]. London: CRC Press, 2010.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

## 作者简介



林丹, 硕士, 讲师, 主要研究方向为川菜工业化。  
E-mail: lindandgrlzl@qq.com



贾洪锋, 硕士, 教授, 主要研究方向为食品分析与检测技术。  
E-mail: jiahongfeng\_cq@163.com